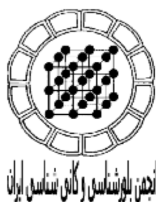
مجله
بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال سی ام، شمارهٔ دوم، تابستان ۱۴۰۱، از صفحهٔ ۱۹۱ تا ۲۰۶



کانی شناسی و زمین شیمی عناصر اصلی، کمیاب و خاکی نادر نهشته بوکسیتی پیراشکفت، ممسنی، استان فارس

بتول تقی پور، شوکت جهانگیرزاده*

گروه علوم زمین، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۴/۸، نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۷/۳)

چکیده: نهشته بوکسیتی پیراشکفت در یال شمالی تاقدیس پسکوهک درمنطقه پیراشکفت در استان فارس، واقع است. افق بوکسیتی پیراشکفت بین سازند سروک و سازند گورپی در پی بیرون آمدگی اواخر تورنین که پیامد فاز کوهزایی لارامید است، تشکیل گردیده‌است. با توجه به بررسی‌های زمین‌شناسی منطقه، بوکسیت پیراشکفت از نوع کارستی است. کانسنگ بازماندی مورد بررسی در پیراشکفت را می‌توان به سه گروه: بوکسیت کائولینیتی، بوکسیتی و بوکسیت فریتی رده‌بندی کرد. بر اساس بررسی‌های سنگ‌نگاری، بافت غالب بوکسیت پیراشکفت پیزوئیدی – اووئیدی است. بر پایه بررسی‌های کانی‌شناسی، کانی‌های اصلی شامل بوهمیت، هماتیت، دیاسپور و کائولینیت و کانی‌های فرعی گیبسیت و روتیل هستند. اکسید عناصر اصلی در افق‌های بوکسیتی بیشتر شامل Al_2O_3 (۳۷٫۸۸-۵۵٫۴۵ wt%)، SiO_2 (۲٫۰۱-۳۰٫۴۹ wt.%)، Fe_2O_3 (۱۰٫۱۴ -۳۶٫۷۱wt. %) و با مواد فرار (LOI) ۹٫۷۲- ۱۵٫۱۳wt.%، است. براساس نمودار دو متغیره Al_2O_3 نسبت به TiO_2، همبستگی مثبت قوی بین این دو اکسید برقرار است. افق‌های بوکسیتی دارای نسبت بالای عناصر خاکی نادر سبک به سنگین هستند. بی‌هنجاری Eu/Eu^* نمونه‌های واحدهای بوکسیتی از ۰٫۹۹ – ۰٫۲۶ در تغییر است. بی‌هنجاری مثبت Ce/Ce^* در گستره ۲٫۳۳-۱٫۲ نشان دهنده‌ی شرایط اکسایشی غالب در بوکسیتی شدن است.

واژه های کلیدی: *بوکسیت کارستی؛ کانی شناسی؛ زاگرس چین خورده.*

مقدمه

بوکسیت ذخیره‌ی اصلی آلومینیوم است، این کانسنگ در نتیجه هوازدگی سنگ‌های مختلف در آب و هوای گرمسیری یا شبه گرمسیری با توجه به ریختار و زهکشی مناسب تشکیل می‌شود [۲،۱]. از نظر سنگ‌شناسی سنگ بستر، ذخایر بوکسیت به ۳ گروه رده‌بندی می‌شوند: ۱- ذخایر لاتریتی که بر سنگ‌های آلومینوسیلیکاتی آذرین و دگرگونی و در نتیجه‌ی هوازدگی آنها در هوای گرم و مرطوب گرمسیری یا شبه گرمسیری تشکیل می‌شوند، ۲- ذخایر کارستی که بر روی فرورفتگی‌های سنگ‌های کربناتی تشکیل می‌شوند و ۳- ذخایر نوع تیخون که بطور دگرشیب بر سنگ‌های آلومینوسیلیکاتی رسوبی بدون ارتباط مستقیم زایشی با سنگ‌های زیرین قرار دارند [۳،۱]. اغلب برای کانی‌شناسی بوکسیت‌ها از نمونه‌های به خوبی حفظ شده و با اندازه‌ی حدود ۱۰ سانتی متر استفاده می‌شود [۴]. ذخایر مهم بوکسیت در ایران در چهار منطقه جغرافیایی شمال غرب ایران، سلسله کوه‌های البرز، فلات ایران مرکزی و ارتفاع‌های زاگرس پراکنده هستند. آنها همچنین از نظرتوزیع زمانی به ۵ دوره پرمین، پرموتریاس، تریاس، تریاس پسین - ژوراسیک و کرتاسه (تورنین – سانتونین) تفکیک می‌شوند [۵]. آب‌های سطحی اکسایشی باعث تجزیه‌ی کائولینیت طی فرآیند آبکافت در محیط تقریبا خنثی (pH =۴ - ۷) می‌شود. انحلال کائولینیت باعث افزایش pH، انحلال کانی‌های رسی و تشکیل گیبسیت می‌شود [۶].

کانی گیبسیت در آغاز مرحله درونزایی در اثر آبزدایی به

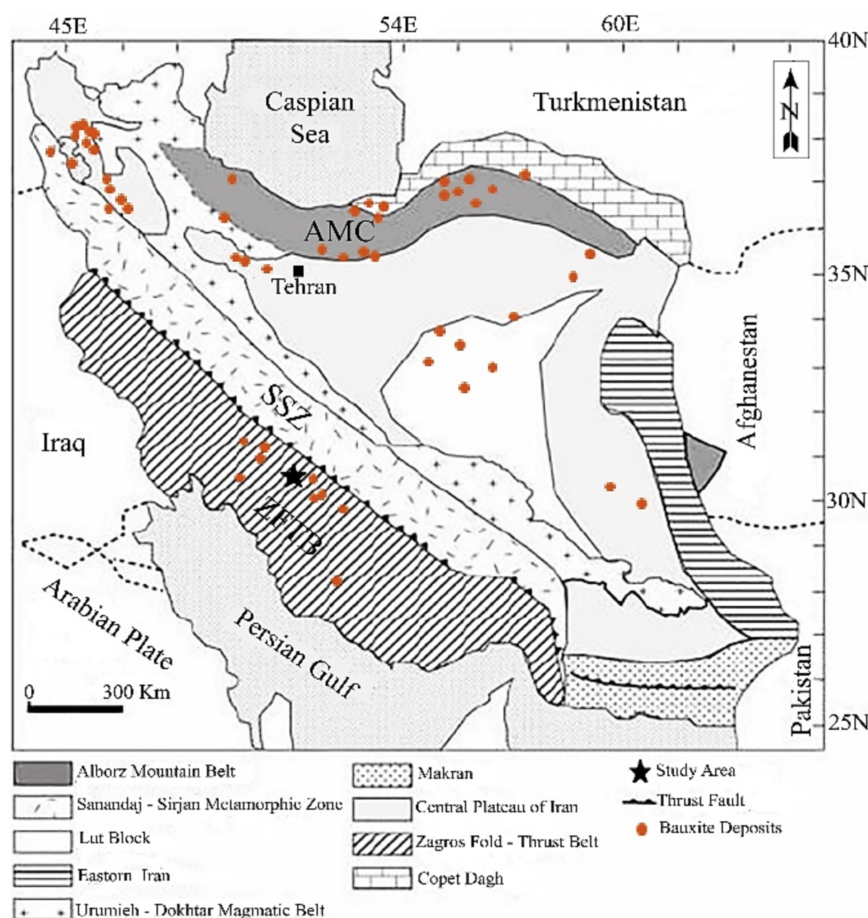
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۷۶۳۵۱۱۶۰، پست الکترونیکی: shokat.jahangirzadeh@gmail.com

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.1.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.191]

بوهمیت تبدیل شده و با دریافت انرژی بیشتر، بوهمیت ممکن است به دیاسپور تبدیل شود. این سازوکار تبدیل با توجه به تناوب دمایی در فصل‌های مختلف انجام می‌گیرد، به طور خلاصه، تجزیه کائولینیت و تبدیل آن به گیبسیت، بوهمیت و دیاسپور در نتیجه آبشویی توسط آب‌های زیرزمینی در شرایط مختلف از مهمترین فرآیندهای مرحله درونزایی می‌باشد [۱]. کانی‌های مهم بوکسیت به مرور دستخوش تغییراتی می‌شوند. بوکسیت‌های جوان (کرتاسه پایانی) غنی از گیبسیت هستند، در صورتی که بوکسیت‌های دوران اول غنی از دیاسپور و نوع پرکامبرین دربردارنده کرندوم است [۷]. منطقه مورد بررسی در گستره طول جغرافیایی ۱۰″ ۳۳′ ۵۱° تا ۶۸″ ۳۳′ ۵۱° و عرض جغرافیایی ۲۹″ ۲۵′ ۳۰° تا ۸۲″ ۲۴′ ۳۰°، در یال شمالی تاقدیس پسکوهک در منطقه پیراشکفت از توابع شهرستان ممسنی در استان فارس قرار دارد. در این پژوهش، با بررسی کانی شناسی، سنگ‌نگاری و روابط بافتی افق‌های دیده شده در نهشته بوکسیتی پیراشکفت، زمین شیمی عناصر اصلی، فرعی و خاکی نادر طی فرآیند بوکسیتی شدن، شرایط تشکیل نهشته بوکسیتی پیراشکفت تعیین می‌شود.

زمین‌شناسی عمومی

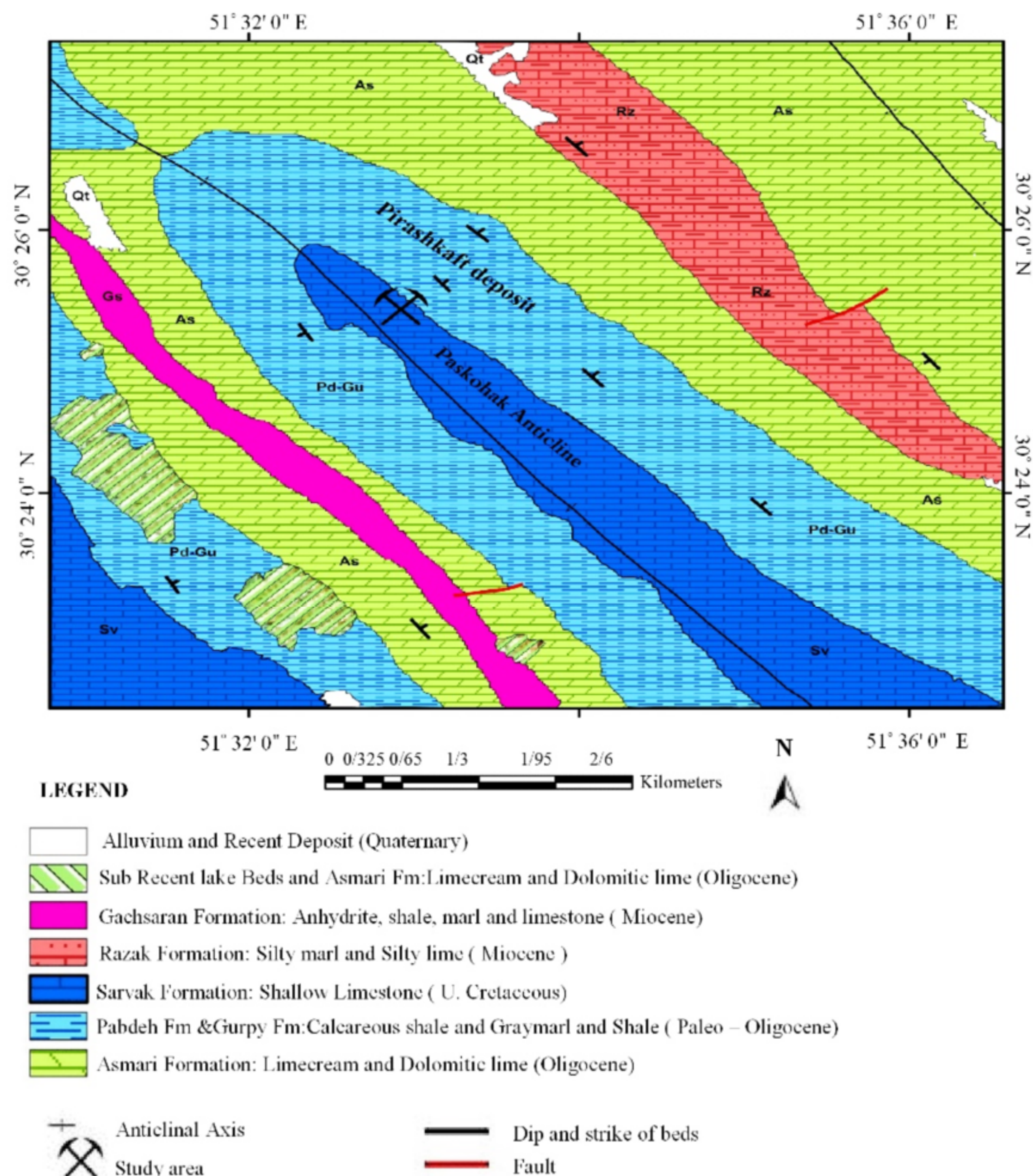
افق بوکسیتی پیراشکفت در یال شمالی تاقدیس پسکوهک (در غرب نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ چشمه دزدان) در پهنه زاگرس چین خورده قرار دارد (شکل ۱). این نهشته در سازندهای کرتاسه در کارست‌های آهک سروک تشکیل شده است. در منطقه پیراشکفت، هسته تاقدیس از آهک‌های دولومیتی سروک و یال آن از شیل‌های خاکستری سازند گورپی به همراه شیل و مارن‌های سازند پابده تشکیل شده است. سنگ آهک‌های کرم رنگ آسماری در ارتفاع‌ها و تبخیری‌های سازند گچساران به همراه ردیف‌های آواری رازک و رسوب‌های عهد حاضر به صورت پراکنده دیده می‌شوند (شکل ۲). محیط رسوبگذاری سازند سروک یک شیبراه کربناتی بوده است که با شیب بسیار ملایم به منطقه ساحلی با آب‌های کم‌عمق می‌رسد [۸].



شکل ۱ موقعیت پهنه‌های زمین‌ساختی ایران و محل قرارگیری نهشته مورد بررسی بر آن (ستاره مشکی).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.1.7]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.191]

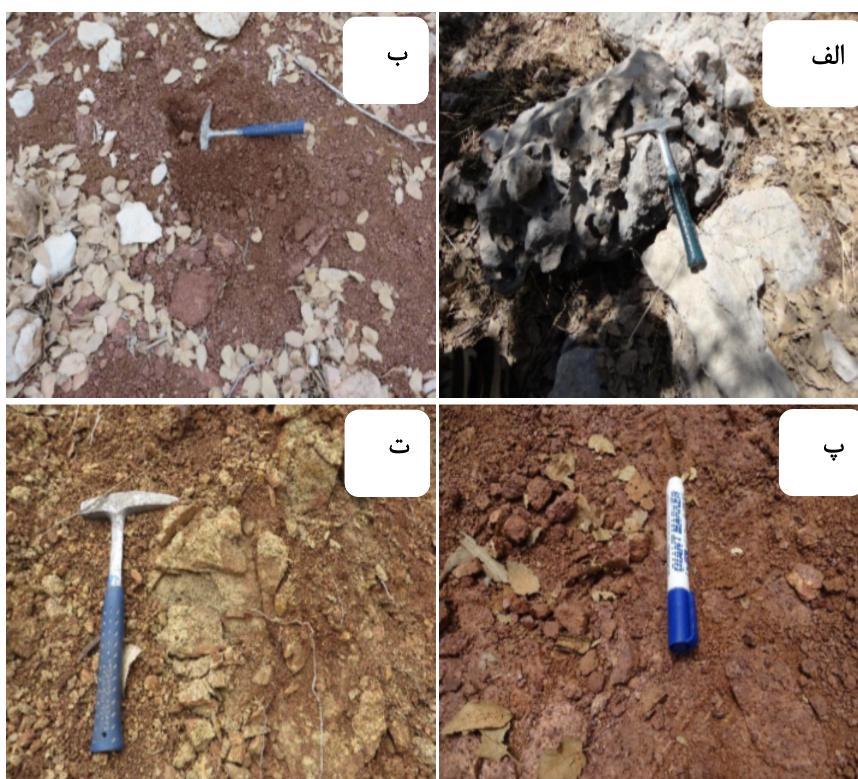


شکل۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی و موقعیت افق بوکسیتی پیراشکفت (برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ چشمه دزدان با تغییرات).

موقعیت افق پیراشکفت، از نظر رده‌بندی زمین‌شناسی در پهنه فارس که بخشی از پهنه زاگرس چین‌خورده است، قرار دارد [۹]. در نمای کلی، چین‌خوردگی‌های موازی با روند ساختاری شمال غربی – جنوب شرقی در منطقه و گسل‌های روراندگی با راستای تقریبی شرقی – غربی و گسل‌های راستا لغز عمود بر محور تاقدیس‌ها متاثر از گسل پی‌سنگی کازرون و گسل میشان دیده می‌شوند [۹]. توالی سنگ‌شناسی در گستره نهشته پیراشکفت رسوبی بوده و از پایین به بالا شامل واحدهای زیر است (شکل۳): لایه‌ی آهکی ضخیم سازند سروک به رنگ زرد تا خاکستری (شکل ۴ الف)، واحدهای بوکسیت قرمز – قهوه‌ای با بافت سست و اغلب پیزوئیدی –اووئیدی می‌باشد (شکل‌های ۴ ب و پ) و واحد بوکسیت زرد و خاکستری (شکل۴ ت). واحد شیلی سازند گورپی بر افق‌های بوکسیتی شیل سازند گورپی قرار دارد که برخلاف سایر ذخایر بوکسیت زاگرس سازند ایلام در این منطقه دیده نمی‌شود.

Age	Strata	Rock type	Stratigraphic column	Sample location
Paleo-Oligocene	Pabdeh Formation	Shale & Gray marl		
	Gurpy Formation	Shale		PR.13
Cenomanian to Turonian	Bauxite horizon	Soil Bauxite		PR.15 PR.12
		Yellow Bauxite		PR. 3 PR.2-3
		Red Bauxite		PR.22 PR.4-1 PR. 8 (XRD PR.10
		Pisolitic Bauxite		PR.6
		Brownish red Bauxite		PR. 3-1 PR.3-2
		Brown Bauxite		PR.16 (XRD PR.8-1
		Gray Bauxite		PR.5-1
U. Cretaceous	Sarvak Formation	Marly limestone		PR.4 PR.14

شکل۳ ستون چینه شناسی نهشته بوکسیتی پیراشکفت. محل برداشت نمونه‌ها با دایره‌های توپر نشان داده شده است.



شکل ۴ الف) واحد آهک سازند سروک که سازند زیرین نهشته بوکسیتی پیراشکفت است. ب) تصویری از خاک سرخ تشکیل شده از لاتریت و بوکسیت. پ) نمای نزدیک از بوکسیت قرمز و ت) نمای نزدیک از بوکسیت خاکستری.

روش بررسی

برای انجام این پژوهش، بررسی‌ها در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی انجام شد. در بررسی‌های صحرایی، برای شناسایی تغییرات بافتی و کانی‌شناسی افق بوکسیتی، از نیمرخ‌های عمود بر لایه و از همه افق‌ها شامل سنگ بستر، افق‌های بوکسیتی که خود شامل بوکسیت‌های زرد، قرمز- قهوه‌ای، قرمز، خاکستری، خاک سرخ بوکسیتی هستند و پوش سنگ شیلی مربوط به سازند پابده –گورپی نمونه‌برداری شد. در بخش آزمایشگاهی تعداد ۱۵برش نازک و ۳ برش صیقلی از افق‌های مختلف بوکسیت‌های پیزولیتی و اوولیتی و سنگ آهک کارستی شده تهیه شد و با میکروسکوپ عناصر بافتی و کانی‌های قابل تشخیص بررسی شدند. به منظور تعیین عناصر اصلی، فرعی، کمیاب و خاکی نادر (REE)، تعداد ۱۰ نمونه در آزمایشگاه زرآزما با دستگاه MMS-01 تجزیه‌ی شیمیایی شدند. نمونه‌ها، نخست خشک و سپس پودر گردیدند. پودر بدست آمده از هر نمونه با لیتیوم بورات آمیخته شده و تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد گرمادهی شد و سپس در اسید نیتریک رقیق گردید. برای اندازه‌گیری مقادیر اکسیدهای اصلی، محلول به‌دست آمده، با روش طیف‌سنجی نشر نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) و برای اندازه گیری مقادیر عناصر جزئی و خاکی نادر، با طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-MS) بررسی شد. حد آشکارسازی برای اکسیدهای اصلی برابر با ۰/۰۵ درصد، برای عناصر کمیاب ۰/۱ تا ۱۰ پی پی ام و برای عناصر خاکی نادر برابر با ۰/۰۵ تا ۱ پی پی ام و با درصد خطای نسبی ۵± درصد است (جدول ۱). تعداد ۱۰ نمونه پودر شده و برای شناسایی فازهای کانیایی با پراش‌سنج پرتو ایکس (XRD) فیلیپس مدل Xpert Pro در شرکت بهین آزمون سپاهان اصفهان تجزیه شدند. برای بررسی دقیق مقادیر عناصر اصلی به ویژه آلومینیوم، آهن و سیلیسیم و مواد فرار (LOI)، تعداد ۵ نمونه پودر شده به مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران برای انجام طیف‌سنجی فلئورسانس پرتوی ایکس (XRF) با دستگاه فیلیپس مدل Magixpro ارسال گردید.

سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی

بافت بوکسیت نشان دهنده چگونگی انباشت و قرار گرفتن واحدهای سازنده آن است. واحد بافت‌ساز می‌تواند از یک کانی و یا کانی‌های مختلف تشکیل شود. بافت بوکسیت‌ها بر اساس ویژگی‌های ریختی و پیدایشی به دو گروه اصلی زمینه و متفاوت از آن قابل تقسیم است [۱]. بررسی‌های انجام شده بر نمونه‌های پیراشکفت نشان می‌دهد بیشتر که واحدهای بافت ساز از نوع اووئیدی –پیزوئیدی هستند. ماده زمینه بر اساس اندازه‌ی ذرات تشکیل دهنده از نوع نامنظم ریخت (شکل ۵ الف)، سراسر خود شکل (شکل ۵ ب) و ریزدانه‌ای (شکل ۵ پ) است. در نمونه‌ی بوکسیت قرمز، هماتیت با بافت نامنظم ریخت (پلیتومورفیک) زمینه را تشکیل می‌دهد، زمینه سراسر خود شکل بیشتر در مقاطع با بافت‌های گیاهی و مواد آلی دیده می‌شود. جنس هسته اووئیدها، به احتمال بسیار از اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت و گوتیت) است که پیرامون آن لایه‌ای از بوهمیت تشکیل شده است. بطور کلی باور این است که این لایه‌ها طی دو مرحله تشکیل شده‌اند؛ نخست در شرایط آب و هوایی مرطوب، هسته‌ی هماتیتی به وجود آمده و سپس در شرایط خشک پسروی و افتادگی سطح آب دریا یا دریاچه رخ داده است. هسته پیزوئیدها می‌تواند از جنس هماتیت و یا کانی‌های دیگر چون: کوارتز، کلسیت و یا کائولینیت باشد. همچنین هسته پیزوئیدها می‌تواند قطعه‌های اووئید یا پیزوئیدهای خرد شده‌ای باشد که پیشتر تشکیل شده، و براثر عوامل زمین‌ساختی، خرد شده و سپس با فرآیندهای حمل و نقل، جابه‌جا شده و در محل انباشت ته نشست کرده و پس از تشکیل لایه‌ها پیرامون آن پیزوئیدهای جدیدی را تشکیل داده‌اند [۱]. کانی گیبسیت به عنوان کانی فرعی در این مقاطع وجود دارد در این افق، زمینه از کلسیت و هماتیت تشکیل شده که نشان دهنده‌ی پدیده‌ی آهن شویی است (شکل۶ الف). بعضی از برش‌ها از هسته درجازای هماتیت و لایه‌های بوهمیت و هماتیت تشکیل شده‌اند (شکل ۶ ب). بطور کلی، شکستگی در پیزوئیدها به دو صورت دیده شده است: الف) شکستگی‌های شعاعی درون اووئید یا پیزوئید که می‌تواند ناشی از فرآیندهای اولیه فشردگی ژل باشد و ب) شکستگی و درزها درون زمینه برآمده از تزریق ژل که زمینه دانه‌ها را قطع می‌کنند [۱۰]. هسته‌های اووئیدی در پیزوئید بزرگ تشکیل شده‌اند (شکل ۶ پ).

پیزوئید با شکستگی‌های شعاعی که زمینه را قطع نموده‌اند (شکل ۶ ت) اغلب بر اثرتزریق ژل ایجاد می‌شود. پیزوئیدها گاهی براثر عوامل زمین‌ساختی خرد و شکسته شده، بخش‌هایی از آن از محیط تشکیل خارج شده و سپس زمینه جای خالی آن را پر می‌کند. تشکیل این پیزوئید به حالت برجازا بوده است، زیرا آثاری از حمل و نقل در آن دیده نمی‌شود (شکل‌های ۶ ث، ج). گاهی پیزوئیدها در اثر عوامل حمل و نقل به درون زمینه انتقال می‌یابند. اگر مواد انتقال یافته از جنس خود قطعه‌های

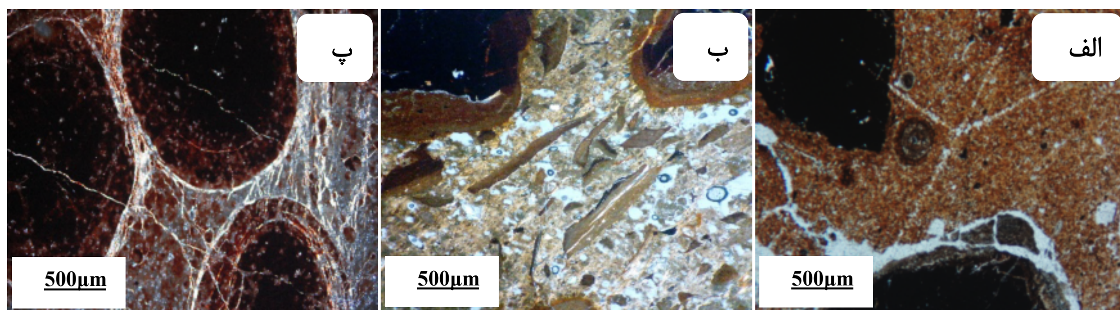
[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.1.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.191]

بوکسیتی باشند (اووئید و پیزوئید شکسته شده) نشان می‌دهد که طی مسیر انتقال، قطعه‌های شکسته شده روی خود کانسار بوکسیتی انتقال یافته و قطعه دیگری وارد کانسار نشده است (قطعه آواری، شکل ۶ چ). در برخی از مقاطع، هسته هماتیتی پیزوئید شکسته که به احتمال بسیار در اثر جابه‌جاشدگی محلی است (شکل ۶ ح). در برخی از نمونه‌ها، بافت اووئیدی دیده شد که دارای اووئیدهای با اندازه‌های متفاوت است (شکل ۶ خ).

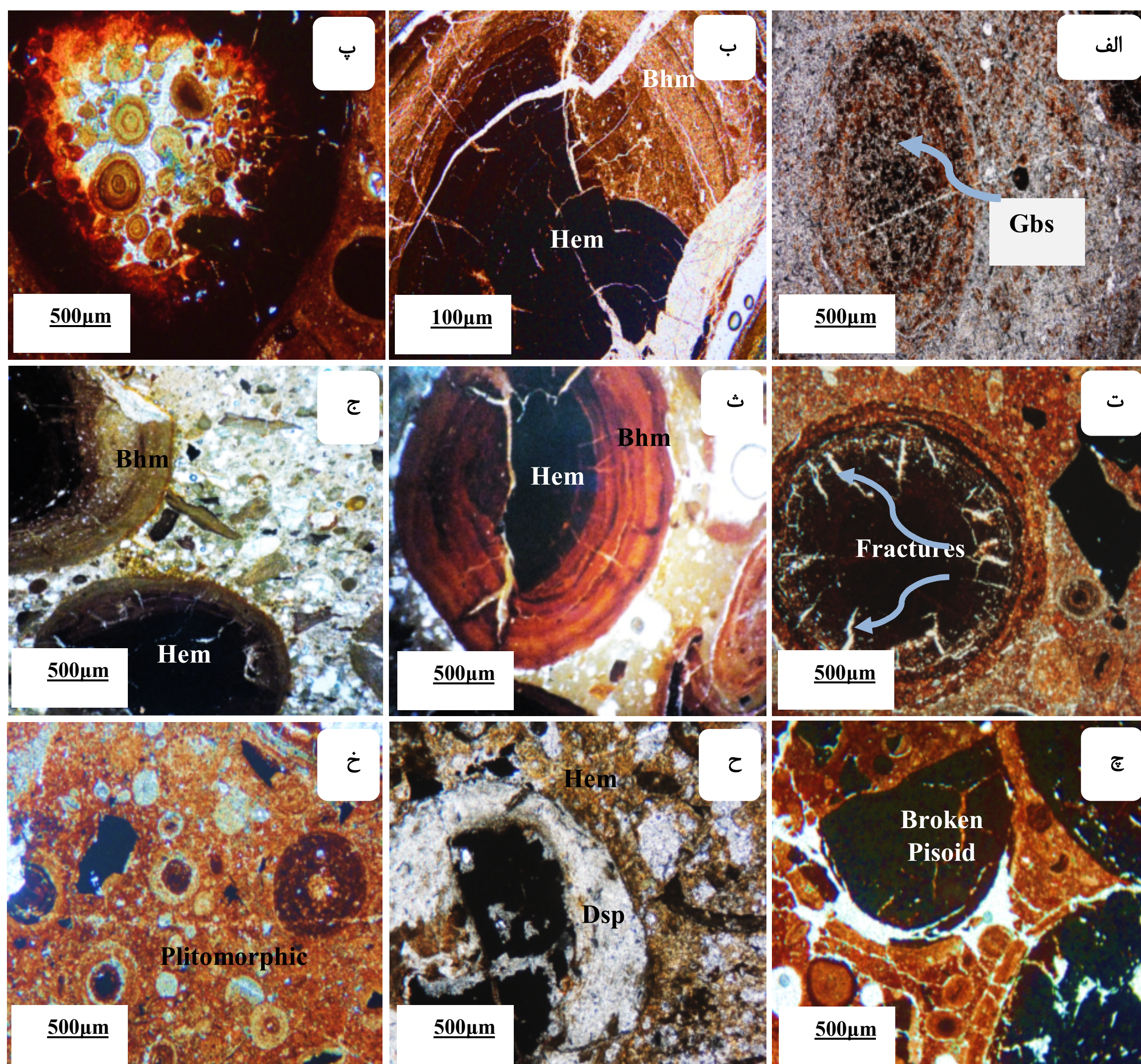
جدول ۱ نتایج تجزیه ICP-MS نمونه‌های نهشته بوکسیتی پیراشکفت. Lim= آهک سروک؛ YB = بوکسیت زرد؛ RB = بوکسیت قرمز؛ PisoB= بوکسیت پیزولیتی؛ GB= بوکسیت خاکستری؛ BB= بوکسیت قهوه‌ای. Clay= OO. Pis= پیزوئید و اووئید؛ RB-BB =بوکسیت قرمز-قهوه‌ای؛ SB= خاک بوکسیتی.

لایه	YB	RB-BB	Lim	GB	PisoB	BB	BS	Clay	Piso.OO	RB
نمونه	PR.3	PR.3-1	PR.4	PR.5-1	PR.6	PR.8	PR.10	PR.15	PR.16	PR.22
SiO_2(wt%)	۱۶٫۶۷	۲۸٫۸۴	۰٫۴۸	۳۰٫۴۹	۱۵٫۴۳	۱۰٫۹۶	۱۸٫۸۴	۲۰٫۰۹	۷٫۱۲	۲٫۰۱
Al_2O_3	۵۵٫۴۴	۳۷٫۸۸	۰٫۵۵	۳۸٫۴۲	۴۹٫۹۷	۴۸٫۶۳	۵۰٫۷۸	۴۸٫۴۸	۴۲٫۷۶	۵۵٫۴۵
TiO_2	۲٫۷۴	۱٫۷۵	۰٫۰۳	۲٫۰۴	۲٫۱۵	۲٫۱۴	۲٫۳۴	۲٫۱۶	۲٫۵۲	۱٫۹۴
Fe_2O_3	۱۰٫۱۴	۱۱٫۷۳	۰٫۱۴	۱۳٫۳۲	۱۸٫۷۱	۲۲٫۰۲	۱۳٫۹۶	۱۳٫۶۸	۳۶٫۷۱	۲۴٫۴۶
CaO	۰٫۳۵	۳٫۴۹	۵۵٫۲۷	۰٫۶۷	۰٫۵۶	۱٫۹۳	۰٫۳۷	۰٫۲۸	۰٫۲۵	۰٫۶۱
MgO	۰٫۷۵	۰٫۵۴	۰٫۰۸	۰٫۵۴	۰٫۴۱	۰٫۴۳	۰٫۶	۰٫۵۸	۰٫۲۸	۰٫۱
Na_2O	۰٫۰۲	۰٫۰۸	۰٫۰۳	۰٫۰۹	۰٫۰۲	۰٫۳۴	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۳
K_2O	۰٫۵۴	۰٫۳۸	۰٫۰۲	۰٫۷۹	۰٫۲۵	۰٫۳۷	۰٫۳۱	۰٫۳۵	۰٫۳۲	۰٫۰۶
P_2O_5	۰٫۱۱	۰٫۰۷	۰٫۰۲	۰٫۳۱	۰٫۰۵	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۵	۰٫۱	۰٫۱
Cr_2O_5	۰٫۰۱	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۲۸	۰٫۰۷	۰٫۰۶	۰٫۰۵	۰٫۰۳	۰٫۱۲	۰٫۱۵
LOI	۱۳٫۱۶	۱۵٫۱۳	۴۳٫۴۱	۱۲٫۸۷	۱۲٫۳۱	۱۳٫۰۲	۱۲٫۶۶	۱۴٫۲۵	۹٫۷۲	۱۴٫۵۳
مجموع	۹۹٫۹۳	۹۹٫۹۲	۱۰۰٫۰۵	۹۹٫۸۲	۹۹٫۹۳	۹۹٫۹۶	۹۹٫۹۹	۹۹٫۹۷	۹۹٫۹۲	۹۹٫۲۵
Ba(ppm)	۶۲۸	۳۰۱	۰٫۵	۶۹۶	۶۹۴	۳۸۶	۶۴۳	۴۹۳	۵۴۰	۳۲۵
Rb	۲۲	۱۰	۰٫۴	۲۴	۱۸	۱۰	۱۰	۱۲	۱۴	۱
Sr	۷۰٫۵	۱۱۲٫۶	۹۷٫۷	۴۸۱٫۵	۵۶٫۶	۶۵٫۸	۴۵٫۷	۵۳٫۵	۵۲٫۱	۳۵٫۶
Zr	۲۵۷	۱۹۱	۴٫۲	۲۹۱	۲۳۸	۲۲۵	۲۴۲	۲۳۳	۳۱۲	۲۱۹
Y	۳۰٫۵	۲۶٫۳	۳٫۷	۴۴	۲۰٫۵	۲۴٫۷	۱۳٫۹	۱۹٫۸	۲۶٫۹	۶۳٫۶
Nb	37	۱۸٫۱	۰٫۵	۳۳٫۷	۳۰٫۵	۲۹٫۴	۳۲٫۹	۳۰٫۹	۳۱٫۳	۲۳
Hf	۸٫۷۴	۶٫۳۶	۰٫۳	۹٫۴۴	۷٫۶۲	۷٫۱۶	۷٫۸۲	۷	۸٫۷۲	۶٫۸۲
Th	۱۹٫۳۱	۱۵٫۴۸	۰٫۰۵	۳۹٫۷۷	۲۳٫۵۳	۲۱	۱۴	۱۵٫۶۱	۳۲٫۵۵	۲۶٫۱۳
Ta	۳٫۴۹	۱٫۵۲	۰٫۳	۲٫۵۱	۲٫۸۵	۲٫۴۸	۲٫۸	۲٫۷۴	۲٫۴۹	۱٫۷۲
Co	۳۴٫۴	۱۹٫۴	۳	۳۶٫۵	۱۹٫۸	۲۳٫۲	۱۹٫۳	۲۰٫۹	۲۲٫۳	۵۸٫۴
U	۵٫۳	۳٫۵	۰٫۰۴	۶٫۷۸	۵٫۴	۴٫۷	۳٫۹	۴	۷٫۴	۸
V	۱۴۶	۱۳۷	۱۴	۳۳۲	۱۵۸	۱۶۲	۱۶۴	۱۴۷	۳۰۹	۱۹۴
Ni	۲۱۰	۱۳۴	۱	۱۶۶	۱۷۲	۱۶۵	۱۷۶	۱۶۴	۱۲۱	۱۸۶
Cr	۲۰۴	۱۹۲	۷	۱۵۷۰	۳۶۰	۳۶۰	۲۶۵	۲۳۰	۸۰۳	۷۹۶
Cs	۸٫۱	۳٫۷	۰٫۳۵	۵٫۷	۵٫۳	۳٫۴	۴	۵٫۷	۵٫۸	۱٫۳
Pb	۲۴	۲۸	۵	۲۰	۳۵	۳۱	۳۲	۲۴	۵۷	۲۸
La	۳۷	۳۴	۳	۶۶	۳۱	۴۴	۱۵	۲۳	۳۸	۱۱۷
Ce	۱۲۴	۹۸	۱۱	۱۸۳	۱۴۳	۱۲۰	۸۹	۸۶	۱۴۰	۶۰۷
Pr	۱۲٫۵۴	۹٫۸۹	۰٫۹۶	۱۵٫۷۱	۱۰٫۷۳	۱۲٫۸۱	۵٫۵۲	۷٫۲۲	۱۱٫۶۵	۳۵٫۹
Nd	۴۸٫۲	۳۷٫۲	۳٫۸	۵۵٫۲	۴۰٫۵	۴۷٫۶	۲۱٫۲	۲۶٫۹	۴۳٫۵	۱۳۲٫۷
Sm	۹٫۸	۶٫۹	۰٫۷۳	۲٫۹۹	۸٫۵۹	۹٫۲۱	۴٫۵۴	۵٫۵۲	۹٫۴۷	۲۸٫۹۲
Eu	۲٫۵۳	۱٫۶۳	۰٫۰۸	۲٫۹	۲٫۲۶	۲٫۳	۱٫۲۳	۱٫۴۲	۲٫۴۷	۷٫۰۴
Gd	۸	۵٫۷۱	۱٫۱۱	۹٫۵۱	۶٫۷۳	۷٫۵۲	۴٫۰۳	۴٫۶۳	۷٫۶۱	۲۵٫۰۴
Tb	۱٫۳۲	۰٫۸۹	۰٫۱۶	۱٫۶۵	۱٫۰۶	۱٫۱۸	۰٫۶۷	۰٫۷۷	۱٫۲۸	۳٫۴۸
Dy	۸٫۲۴	۵٫۷۱	۱٫۰۴	۱۰٫۰۶	۶٫۱۵	۶٫۷۹	۴٫۴	۵٫۰۱	۷٫۳۶	۱۷٫۲۴
Er	۵٫۴۷	۳٫۹۳	۰٫۴۴	۶٫۵۳	۳٫۷۱	۴٫۰۳	۳٫۰۶	۳٫۵۴	۴٫۰۶	۷٫۲۸
Tm	۰٫۸۱	۰٫۵۸	۰٫۰۷	۰٫۹۲	۰٫۵۲	۰٫۵۵	۰٫۴۸	۰٫۵۴	۰٫۵۶	۰٫۸۲
Yb	۵٫۴	۳٫۹	۰٫۲	۵٫۹	۳٫۶	۳٫۷	۳٫۳	۳٫۷	۳٫۷	۴٫۹
Lu	۰٫۸۸	۰٫۶۲	۰٫۰۹	۰٫۹۳	۰٫۵۸	۰٫۵۸	۰٫۵۴	۰٫۵۹	۰٫۵۸	۰٫۷۴
REEΣ	۲۶۴٫۱۹	۲۰۸٫۹۶	۲۲٫۴۴	۳۶۹٫۳	۲۵۸٫۴۳	۲۶۰٫۲۷	۱۵۲٫۹۷	۱۶۸٫۸۴	۲۷۰٫۲۴	۹۸۸٫۰۶
LREEΣ	۲۳۴٫۰۷	۱۸۷٫۶۲	۱۹٫۴۲	۳۳۳٫۸	۲۳۶٫۰۸	۲۳۵٫۹۲	۱۳۶٫۴۹	۱۵۰٫۰۶	۲۴۵٫۰۹	۹۲۸٫۵۶
HREEΣ	۳۰٫۱۲	۲۱٫۳۴	۲٫۹۵	۳۵٫۵	۲۲٫۳۵	۲۴٫۳۵	۱۶٫۴۸	۱۸٫۷۸	۲۵٫۱۵	۵۹٫۵
Eu/Eu*	۰٫۸۸	۰٫۸	۰٫۲۶	۰٫۸۷	۰٫۹۲	۰٫۸۵	۰٫۸۹	۰٫۸۶	۰٫۹۹	۰٫۸۱
Ce/Ce*	۱٫۳۷	۱٫۲۷	۱٫۵۴	۱٫۳۵	۱٫۸۷	۱٫۲	۲٫۳۳	۱٫۵۹	۱٫۵۸	۲٫۲۳
$(La/Yb)_N$	۴٫۶۴	۵٫۹	۱۰٫۱۸	۷٫۵۸	۵٫۸۳	۸٫۰۵	۳٫۰۸	۴٫۲۱	۶٫۹۶	۱۶٫۱۸
ΣLREE	۷٫۷۷	۸٫۷۹	۶٫۶۱	۹٫۴	۱۰٫۵۶	۹٫۶۹	۸٫۲۸	۷٫۹۹	۹٫۷۵	۱۵٫۶۱

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.1.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.191]



شکل ۵ انواع بافت زمینه در نمونه‌های بوکسیت پیراشکفت. الف) نامنظم ریخت (پلیتومورفیک)، ب) سراسر خود شکل و پ) ریزدانه‌ای.

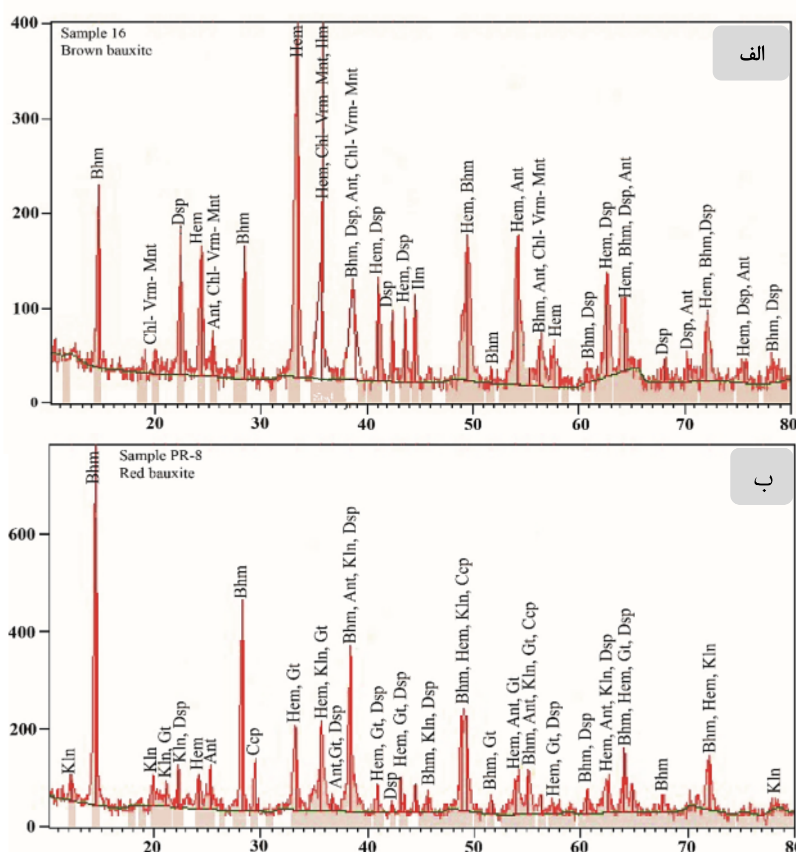


شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی نهشته بوکسیتی پیراشکفت: الف)کانی گیبسیت در بافت تخریبی شدید (4x)، ب) پیزوئید با ترک‌های انقباضی (10x). پ) هسته اووئیدی در پیزوئید بزرگ (4x). ت) شکستگی‌های شعاعی ناشی از تزریق ژل در پیزوئیدهای نیمه خرد شده (4x). ث) پیزوئید تشکیل شده با لایه‌هایی از اکسید آهن و اکسید آلومینیوم پس از شکستگی پیزوئید بر اثر تزریق ژل، (4x). ج) پیزوئید برجازاد (4x). چ) پیزوئید دگرزاد داخل ماتریکس میکروگرانولار (4x). ح) هسته آواری شکسته که پیرامون آن لایه‌هایی از دیاسپور تشکیل شده است (4x) و خ) بافت اووئیدی (4x). همه تصاویر در نور قطبیده متقاطع، xpl، ثبت شده‌اند. (هماتیت = Hem ، بوهمیت = Bhm، دیاسپور= Dsp، گیبسیت= Gbs).

نتایج پراش پرتو ایکس (XRD) از نهشته بوکسیت پیراشکفت نشان می‌دهد که فازهای کانیایی موجود در بوکسیت پیراشکفت شامل هیدروکسیدهای آلومینیوم (بوهمیت، دیاسپور و گیبسیت)، اکسید و هیدروکسید آهن (هماتیت و گوتیت)، اکسید تیتانیوم (روتیل، آناتاز و ایلمنیت)، کانی‌های سیلیکاتی (کائولینیت، مونت موریلونیت، ورمیکولیت، شاموزیت)، کانی‌های REEدار چون سریانیت و مونازیت، کانی‌های سولفاتی (کالکوپیریت و تالناکیت) و کانی‌های کربناتی (کلسیت و دولومیت) است (جدول ۲ و شکل۷). در افق بوکسیتی، کانی آلومینیوم‌دار غالب بوهمیت است. کانی گیبسیت به عنوان یک کانی فرعی در افق بوکسیتی دیده می‌شود.

جدول ۲ نتایج پراش پرتو ایکس XRD نمونه‌های افق بوکسیتی پیراشکفت.

نمونه	نوع سنگ	فازهای کانیایی اصلی	فازهای کانیایی فرعی
PR-3	بوکسیت زرد	بوهمیت، هماتیت آناتاز و کائولینیت	گیبسیت، بایریت،پیروکلریت، توریت
PR-4	آهک	کلسیت	اسپینل، کالکوپیریت
PR-5-1	بوکسیت خاکستری	بوهمیت و کائولینیت	فلوگوپیت، دیاسپور،کائولینیت، ناکریت و آناتاز
PR-6	بوکسیت پیزولیتی	بوهمیت، دیاسپور، هماتیت و کائولینیت	کریستوبالیت، کاسیدریت و بوراکیت
PR-8	بوکسیت قرمز- قهوه‌ای	بوهمیت، دیاسپور، آناتاز، کائولینیت،گوتیت و هماتیت	ایلمنیت
PR-10	خاک سخت	بوهمیت، هماتیت، آناتاز، کائولینیت و هالویسیت	پیروکلریت، بایریت و توریت
PR-13	شیل(پوش سنگ)	کلسیت و کوارتز	اسپینل و دولومیت
PR-14	آهک کارستی	کلسیت و سیلیکا	دولومیت
PR-15	خاک رس (زردرنگ)	بوهمیت، کائولینیت و گوتیت	روتیل، آناتاز،ورمیکولیت- مونت‌موریلونیت و ایلمنیت
PR-16	پیزوئید - اووئید	بوهمیت، دیاسپور، هماتیت، آناتاز، کلریت-ورمیکولیت- مونت موریلونیت و ایلمنیت	پیروتیت



شکل۷ نتایج XRD افق‌های مختلف بوکسیت پیراشکفت. الف) نمونه‌ای از بوکسیت قهوه‌ای، باکانی‌های: بوهمیت، هماتیت، آناتاز، مونت موریلونیت و کائولینیت. ب) نمونه‌ای از بوکسیت قرمز، با کانی‌های: بوهمیت، هماتیت، دیاسپور، گوتیت، کائولینیت و آناتاز. (هماتیت=Hem،بوهمیت=Bhm، دیاسپور=Dsp، کائولینیت= Kln ، گوتیت= Gt، آناتاز=Ant، ایلمنیت= Ilm، کالکوپیریت= Ccp، کلریت- ورمیکولیت - مونت موریلونیت= (Chl- Vrm- Mnt.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.1.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.191]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.1.7]

[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.191]

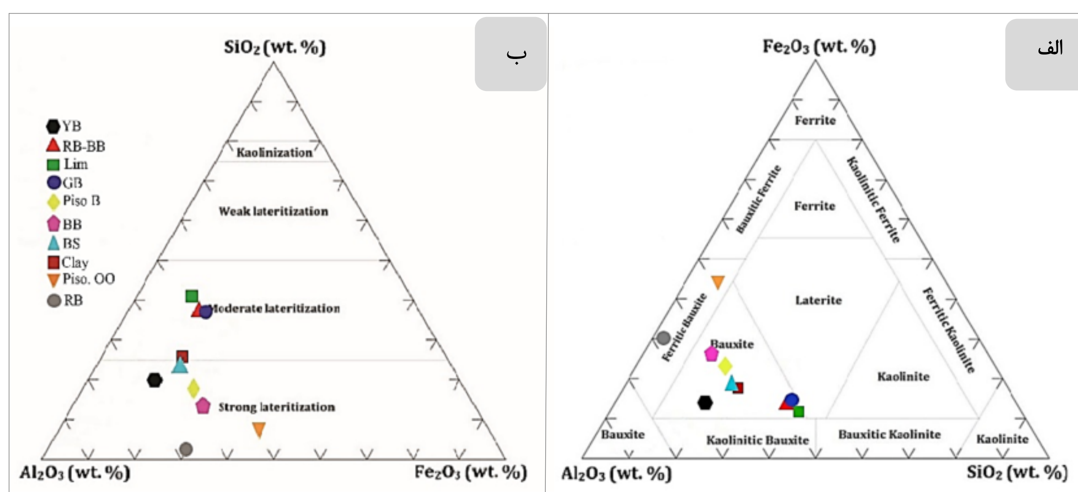
زمین‌شیمی

عناصر اصلی

اکسیدهای عناصر اصلی Al_2O_3، Fe_2O_3 و SiO_2 در نمونه‌های افق بوکسیتی تغییرات بسیاری نشان می‌دهند اما دیگر اکسیدها تغییرات کمی دارند (جدول ۱). عناصر اصلی بوکسیت‌ها بیشتر از Al_2O_3 (wt% ۳۷٫۸۸-۵۵٫۴۵)، SiO_2 (۲٫۰۱-۳۰٫۴۹ wt.%)، Fe_2O_3 (۱۰٫۱۴ -۳۶٫۷۱wt.%) و TiO_2 (۱٫۷۵-۲٫۵۲ wt.%) با ۹٫۷۲- ۱۵٫۱۳ wt.% موادفرار (LOI)، تشکیل شده‌اند. مقدار بالای SiO_2 با ۳۰٫۴۹ wt.% می‌تواند بیانگر حضور کائولینیت باشد که سبب لاتریتی شدن شدید می‌شود (جدول ۳) [۱۲،۱۱]. مقدار Fe_2O_3 در شرایط پتانسیل اکسایش - کاهش (Eh) مختلف، متغیر است، بنابراین افزایش غلظت Fe_2O_3 در افق بالایی ویژگی کانی‌های آهن‌دار هماتیت و گوتیت است که در شرایط مناسب pH و Eh در طول هوازدگی و فرآیند کارستی شدن تشکیل می‌شوند [۱۳]. از نمودار سه متغیره Fe_2O_3- Al_2O_3 – SiO_2 [۱۰] برای نشان دادن درجه لاتریتی شدن و رده‌بندی بوکسیت استفاده شده است (شکل ۸ الف). بر این اساس، کانسنگ بازماندی مورد بررسی در پیراشکفت را می‌توان در سه گروه بوکسیت کائولینیتی، بوکسیتی، و بوکسیت فریتی رده‌بندی کرد. نمودار سه متغیره در شکل ۸ ب نشان می‌دهد که سنگ مادر طی تبدیل شدن به کانسنگ لاتریتی- بوکسیتی در پیراشکفت دستخوش فرایندهای لاتریتی شدن متوسط تا شدید شده است. نمونه‌های غنی از Al_2O_3، لاتریتی شدن درجه بالا و نمونه‌های غنی از SiO_2 لاتریتی شدن ضعیف را نشان می‌دهند (شکل ۸ ب).

جدول ۳ نتایج تجزیه XRF نمونه‌های نهشته بوکسیتی پیراشکفت (اکسید عناصر اصلی برحسب درصد) حد آشکارسازی0.1wt% است. (Lim = آهک سروک؛ YB = بوکسیت زرد؛ BB= بوکسیت قهوه‌ای. RB-BB = بوکسیت قرمز- قهوه ای؛ SB= خاک بوکسیتی.

نمونه	PR.8-1	PR.2-3	PR.3.2	PR.12	PR.4-1
لایه	BB	YB	RB-BB	SB	Lim
SiO_2	۱۷٫۶۷	۱۹٫۰۷	۲۹٫۵۳	۱۸٫۶	۰٫۷
Al_2O_3	۴۸٫۶۲	۵۲٫۳	۴۱٫۵	۵۲٫۵۵	۰٫۸۶
TiO_2	۱٫۸۵	۲٫۲۲	۱٫۵۷	۲٫۱۳	۰٫۰۷۵
Fe_2O_3	۱۷٫۲	۹٫۸۷	۸٫۰۸	۱۲٫۰۶	۰٫۰۷۵
CaO	۱٫۴۲	۰٫۵	۲٫۷۲	۰٫۴۲	۵۴٫۷۶
MgO	۰٫۲۸	۰٫۴۴	۰٫۳۸	۰٫۴۶	۰٫۱۳
K_2O	۰٫۲۶	۰٫۴	۰٫۳۳	۰٫۳۶	۰٫۰۷۵
LOI	۱۲٫۵۲	۱۵٫۰۴	۱۵٫۸	۱۳٫۳۱	۴۳٫۵۵
مجموع	۹۹٫۸۲	۹۹٫۸۴	۹۹٫۹۱	۹۹٫۸۹	۱۱٫۱۸

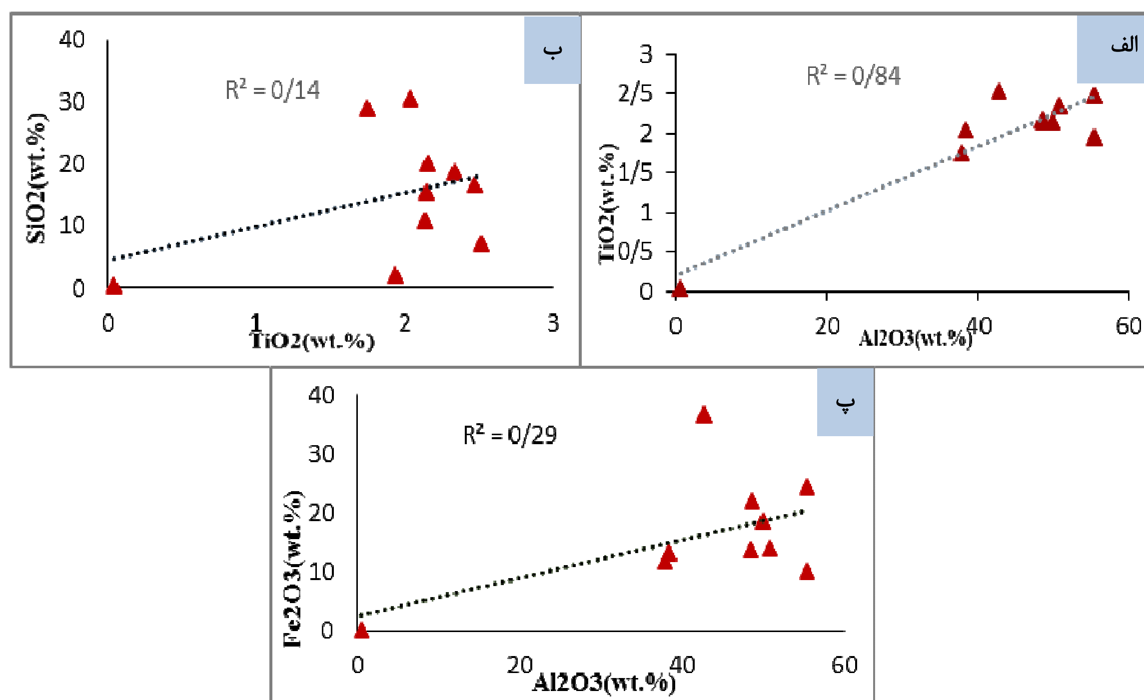


شکل ۸ الف) نمودار سه متغیره Fe_2O_3 -Al_2O_3 -SiO_2 [۱۰] و موقعیت نمونه‌های افق بوکسیتی پیراشکفت بر آن که بیشتر آنها در پهنه بوکسیت، بوکسیت کائولینیتی و به مقدار کمتر در پهنه بوکسیت آهنی قرار دارند. ب) – نمودار سه متغیره Fe_2O_3 -Al_2O_3 -SiO_2 برای تعیین نوع هوازدگی [۱۳] و موقعیت نمونه‌های افق بوکسیتی پیراشکفت بر آن که بیشتر آنها در منطقه لاتریتی شدن قوی تا حد واسط قرار دارند. Lim= آهک سروک؛YB = بوکسیت زرد؛ RB = بوکسیت قرمز؛ PisoB= بوکسیت پیزولیتی؛ GB= بوکسیت خاکستری؛ BB= بوکسیت قهوه‌ای. Clay= خاک رس؛ Pis .OO= پیزوئید و اووئید؛ RB-BB=بوکسیت قرمز- قهوه‌ای؛ BS= خاک بوکسیتی.

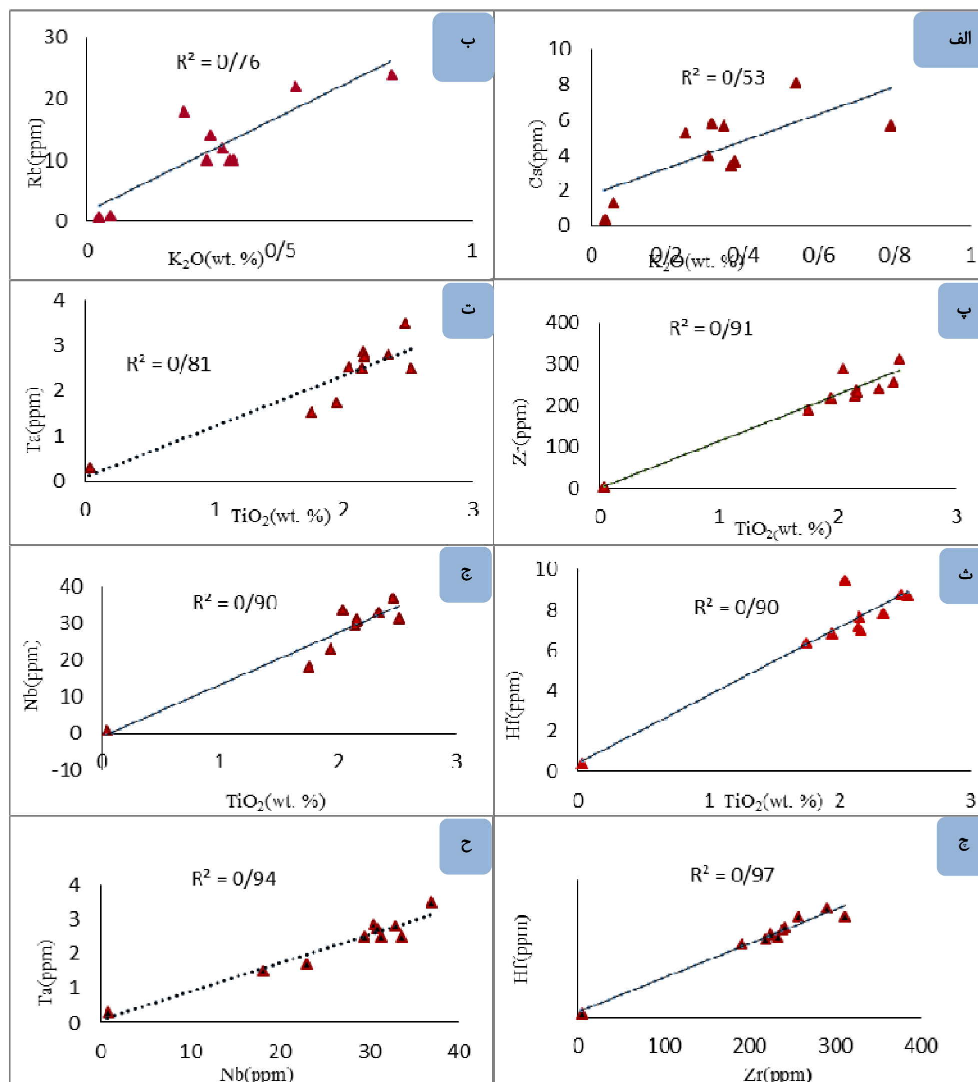
نمودار دو متغیره اکسیدها نشان دهنده همبستگی مثبت قوی بین TiO_2 با Al_2O_3 و همبستگی مثبت ضعیف بین TiO_2 با SiO_2 و همبستگی مثبت بین Fe_2O_3 با Al_2O_3 است (شکل‌های ۹ و ۱۰). افزون براین، در میان اکسید عناصر اصلی، Al_2O_3 و TiO_2 بالاترین همبستگی مثبت را دارند که این نمودارها نشان می‌دهند که سیلیس آبشویی شده و آلومینیوم و تیتانیوم باقی مانده و در افق به شدت هوازده، غنی شده‌اند (شکل ۹ الف). بطور کلی، در کانی‌های تیتانیوم‌دار موجود در بوکسیت‌های کارستی در درجه اول آناتاز، سپس روتیل و پس از آنها، ایلمنیت حامل Ti هستند. آناتاز از جمله فراوان‌ترین کانی‌های بوکسیت کارستی است. بیشتر آناتاز موجود در بوکسیت‌های کارستی همزاد هستند و در زمینه بوکسیت توزیع شده‌اند، آناتاز از کانی‌هایی است که در شرایط اسیدی و بارش زیاد تشکیل می‌شود، در حالیکه بوهمیت و دیاسپور در شرایط قلیایی ضعیف تا متوسط شکل می‌گیرند. روتیل پس از آناتاز فراوان‌ترین کانی تیتان در بوکسیت کارستی بوده و در مواردی که به صورت کانی ثانویه دیده می‌شود، فراورده دگرسانی ایلمنیت است [۱]. حضور آناتاز در کانسار بوکسیت نشان دهنده‌ی شرایط کاهشی و pH پایین در تشکیل بوکسیت کارستی است [۱۴].

عناصر کمیاب

فراوانی عناصر کمیاب از چند ppm تا بیش از ۶۰۰ppm (Ba) است. نمونه‌های بوکسیت دارای Zr(۱۹۱-۳۱۲ppm)، Y(۳/۷-۶۶/۶ppm)، Nb(۱۸-۳۷ppm)، Hf(۶/۳۶-۹/۴۴ppm)، Th(۱۴-۳۹/۷۷ ppm)، U(۰/۴-۸ppm)، Ba(۳۰۱-۶۹۶ppm)، Sr(۳۵/۶-۴۸۱/۵ppm)، Rb(۱-۲۴ppm)، Cs(۱/۳-۸/۱ppm) و Pb(۵-۵۷ ppm) در افق بوکسیتی است (جدول ۱). Ba و Sr در بوکسیت خاکستری و بوکسیت قرمز – قهوه‌ای پیزوئیدی غنی شده‌اند. Ba فراوان‌ترین عنصر سنگ دوست بزرگ یون (LILE) بوده که در کانی‌های دارای K جانشین شده است. غلظت بالای عناصر Ba و Sr نشان می‌دهد که این عناصر به صورت جذب سطحی وارد ساختار کانی‌هایی چون کائولینیت و دیکیت می‌شوند. عناصر سنگ دوست بزرگ یون نسبت به Ti به شدت تهی شده‌اند. بین Cs و K_2O همبستگی مثبت متوسط دیده می‌شود، Cs می‌تواند جانشین پتاسیم در کانی‌های رسی شود (شکل ۱۰ الف). بین Rb و K_2O همبستگی مثبت قوی وجود دارد و Rb به صورت استتار شده جانشین K در شبکه کانی‌های رسی شده است (شکل ۱۰ ب). بوکسیت‌های کارستی با مقدار بالایی از Al_2O_3، TiO_2 و عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) و فراوانی کانی‌های آواری چون زیرکن، تورمالین و روتیل شناخته می‌شوند [۱۵].



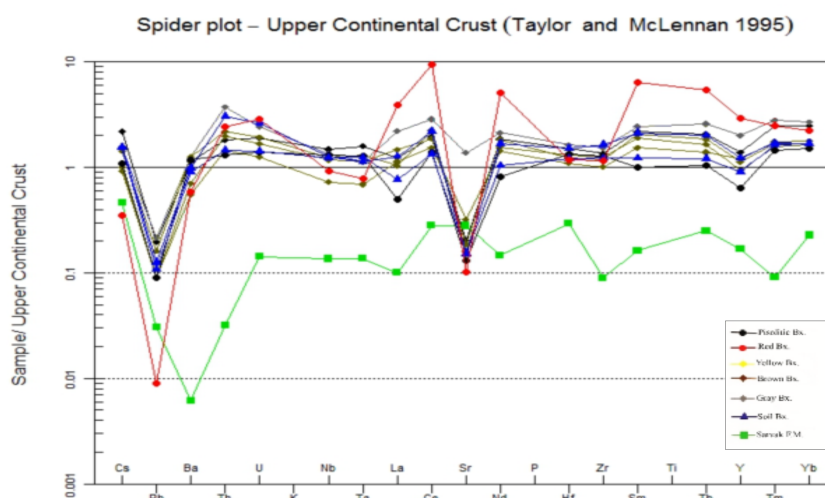
شکل ۹ نمودارهای دوتایی ضرایب همبستگی: الف) نمودار Al_2O_3 نسبت به TiO_2 , ب) نمودار SiO_2 نسبت به TiO_2 ، پ) نمودار دو متغیره Al_2O_3 نسبت به Fe_2O_3.



شکل ۱۰ نمودارهای دوتایی ضرایب همبستگی: الف) نمودار Cs نسبت به K_2O، ب) نمودار Rb نسبت به K_2O، پ) نمودار TiO_2 نسبت به Zr. ت) نمودار TiO_2 نسبت به Ta، ث) نمودار TiO_2 نسبت به Hf، ج) نمودار TiO_2 نسبت به Nb . چ) نمودار Zr نسبت به Hf. و ح) نمودار Nb نسبت به Ta.

برای نمونه‌های بوکسیت، TiO_2 دارای بالاترین ضریب همبستگی مثبت با HFSEها چون Zr، Ta، Hf و Nb (۰/۹-۰/۸ =R^2) است (شکل‌های ۱۰ پ تا ج). همچنین Zr نسبت به Hf با ضریب همبستگی بالا (۰/۹۷ = R^2، شکل ۱۱ چ) و Ta نسبت به Nb با ضریب همبستگی بالا (۰/۹۴ = R^2) است. بنابراین، این عناصر می‌توانند جانشین هم شوند، زیرا دارای بار و شعاع یونی مشابه هستند (شکل ۱۰ ح). براساس ویژگی‌ها، عناصر HFSE و Ti، رفتار زمین‌شیمیایی مشابهی را نشان می‌دهند و طی فرآیند بوکسیتی شدن به نسبت متحرک هستند [۱۶]. در شکل ۱۱، الگوی توزیع عناصر جزئی نسبت به پوسته قاره‌ای بالایی نشان داده شده است. دیده می‌شود که بیشترین غنی شدگی مربوط به عنصر Ti است. این الگو برای همه نمونه‌ها غنی شدگی از عناصر Ba, U, Nb, Th و Ti و تهی شدگی از Rb و Sr را نشان می‌دهد، در حالیکه نمونه‌های آهکی سروک روندی متفاوت دارند. برای مثال، واحد کربناتی از عناصر Ba و Ti تهی شده، که به علت تحرک این عناصر است. برای همه نمونه‌ها، غنی شدگی عنصر U دیده می‌شود، بنابراین افق هوازده خاستگاه پوسته‌ای دارد. تغییرات زمین‌شیمیایی (غنی شدگی و تهی شدگی) در عناصر کمیاب به عوامل انتقال فازهای کانیایی در سنگ خاستگاه مربوط می‌شود؛ عناصر بسیار متحرک در بوکسیت غنی‌شدگی نشان می‌دهند و انحلال ناپذیرند [۱۷].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.1.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.191]



شکل ۱۱ الگوی توزیع عناصر جزئی نمونه‌های بوکسیت پیراشکفت نسبت به پوسته قاره‌ای بالایی [۱۸].

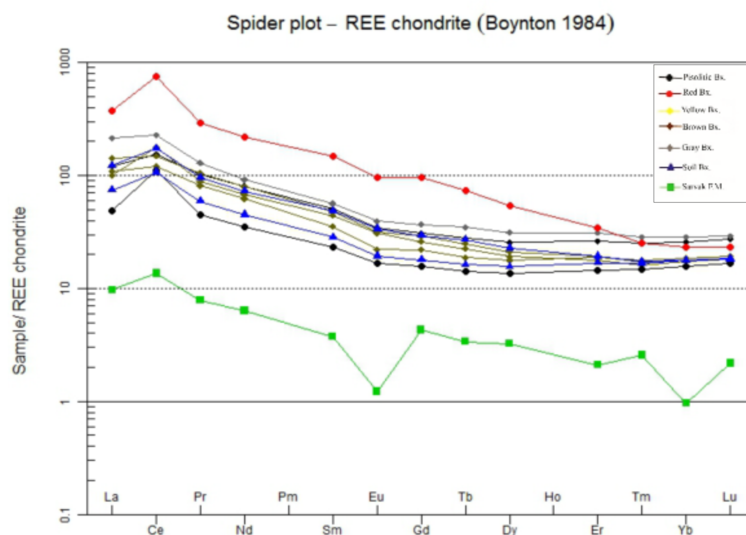
عناصر خاکی نادر (REE)

رفتار REEها طی هوازدگی تا حدود بسیاری به pH و Eh، نقش ریزاندامگان، کانی‌های ثانویه و ماهیت سنگ بستر بستگی دارد [۱۸-۲۲]. طی فرآیندهای کائولینیتی شدن و لاتریتی شدن، REEها می‌توانند از کانی‌های اولیه آزاد شده و جذب بسیاری از کانی‌های جاذب شوند. بنابراین کانی‌های ثانویه مانند کانی‌های فسفاتی (آپاتیت)، کانی‌های رسی همراه با اکسید و هیدروکسیدهای Fe و Mn، عوامل مهم در درجه آبشویی و تفکیک REEها هستند [۱۳]. عناصر خاکی نادر سبک (LREE) در شرایط اسیدی می‌توانند به آسانی از بخش‌های بالایی آبشویی شده و در بخش‌های پایین‌تر متمرکز شوند که این به دلیل پتانسیل یونی پایین‌تر LREEها نسبت به HREE هاست [۲۳-۲۵]. نمودار تغییرات REEهای بهنجار شده با کندریت‌ها و نسبت $(\Sigma LREE/\Sigma HREE)_N$ و $(La/Yb)_N$ سالها به عنوان شاخص‌های قابل اطمینانی برای تفکیک عناصر خاکی نادر سبک از سنگین در ذخایر فلزی و غیر فلزی به کار رفته است [۲۶،۲۵]. سنگ آهک سازند سروک به عنوان سنگ بستر نهشته بوکسیتی پیراشکفت با مقادیر پایین عناصر خاکی نادر (۲۲٫۴۴ ppm) مشخص می شود. کانسنگ‌های بوکسیتی با مقادیر عناصر خاکی نادر متغیر (۱۵۲٫۹۷ تا ۹۸۸٫۰۶ ppm)، نسبت‌های $(La/Yb)_N$ از ۳٫۰۸ تا ۱۶٫۱۸، بی هنجاری‌های منفی Eu از ۰٫۲۶ تا ۰٫۹۹ و بی هنجاری های مثبت Ce (۱٫۲ تا ۲٫۳۳) توصیف می‌شوند (جدول ۱). پس از بهنجار سازی با کندریت [۱۸]، الگوی توزیع عناصر خاکی نادر، نمونه‌های بوکسیت و سازند سروک رفتار مشابهی از غنی‌شدگی در LREEها و تهی‌شدگی در HREEها نشان می‌دهند (شکل ۱۲). غنی شدگی LREEها نسبت به HREEها از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۷]:

$$(La/Yb)_N = (La/La_N) / (Yb/Yb_N) \qquad (۱)$$

غنی شدگی بیشتر LREE ها نسبت به HREE ها در نهشته بوکسیتی پیراشکفت نشان دهنده‌ی هوازدگی شدید و لاتریتی شدن قوی در نهشته و نیز تشکیل سریانیت و فلورنسیت به صورت برجاست. نسبت $\Sigma LREE (La\text{-}Sm)/\Sigma HREE (Gd\text{-}Lu)$ در نمونه‌های بوکسیتی پیراشکفت و سنگ میزبان کربناتی سروک (۱۰٫۵) بسیار بالاتر از بوکسیت‌های لاتریتی با سنگ خاستگاه فرامافیک (۳٫۳) و بازی (۱٫۹) است [۲۸] (جدول ۱). بنابراین احتمال کربناتی بودن سنگ خاستگاه بالاست. بی‌هنجاری مثبت Ce در نیمرخ بوکسیتی پیراشکفت به احتمال بسیار می‌تواند مربوط به تشکیل سریانیت و نیز CeO_2 پایداری CeO_2 که به شرایط pH و Eh بستگی دارد باشد. کاهش pH و Eh باعث تبدیل Ce^{4+} به Ce^{3+} می‌شود، بالاترین مقدار بی‌هنجاری مثبت Ce مربوط به پیزوئید و اووئیدها و کمترین مقدار آن مربوط به بوکسیت قهوه‌ای است [۳۰،۲۹]. بی هنجاری مثبت Ce به احتمال بسیار به نوسان‌های سطح آب زیرزمینی و ماهیت بافر بودن سنگ بستر کربناتی مربوط است [۳۱]. مقدار بی‌هنجاری Eu حدود ۰٫۹۹ – ۰٫۲۶ است. کمترین و بیشترین بی‌هنجاری Eu به ترتیب مربوط به سنگ بستر کربناتی و افق بالایی یعنی خاک سخت کمی بوکسیتی است. مقدار بی‌هنجاری Eu تقریبا در همه نهشته یکنواخت است که نشان می‌دهد که فرآیند بوکسیتی شدن اثری بر بی‌هنجاری Eu ندارد. از بی‌هنجاری Ce و Eu می‌توان برای ارزیابی شرایط فیزیکوشیمایی طی بوکسیتی شدن استفاده کرد [۲۵، ۳۲، ۳۳].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.1.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.191]

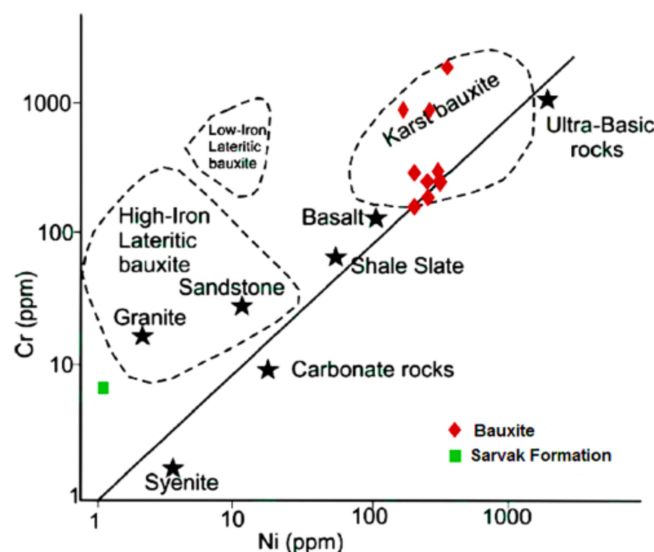


شکل ۱۲ الگوی توزیع عناصر خاکی نادر نمونه‌های بوکسیت و سنگ بستر آهکی نهشته پیراشکفت نسبت به کندریت [۳۴].

تعیین نوع نهشته بوکسیتی پیراشکفت

شیمی عناصر باعث تفکیک یا باقی ماندن آنها در سنگ خاستگاه طی بوکسیتی شدن می‌شود. عناصر قلیایی و قلیایی خاکی مهمترین عناصر متحرک طی بوکسیتی شدن هستند که کانی‌های ثانویه پایداری در افق بوکسیتی ایجاد نمی‌کنند [۸]. این در حالی است که برخی از عناصر کمیاب چون Ni, Cr, Hf, Ga, Ta, Th, Nb, Zr, Ti و HREEها طی بوکسیتی شدن و هوازدگی به عنوان عناصر نامتحرک شناخته می‌شوند و بنابراین برای تعیین سنگ خاستگاه بوکسیت‌ها در مراحل مختلف فرآیند بوکسیتی شدن استفاده می‌شوند [۱۸]. توالی کربنات‌هایی که دستخوش کارستی شدن شده می‌تواند به عنوان سنگ خاستگاه بوکسیت محسوب شود، اگرچه انحلال سنگ بستر کربناتی به تنهایی سازوکار کافی برای تشکیل کانسنگ نیست، سنگ شناسی‌های متفاوت برای سنگ خاستگاه بوکسیت‌های کارستی پیشنهاد می‌شود از جمله ترکیب آرژیلیت به همراه کربنات، خاکستر آتشفشانی، رسوب-های بادی و سنگ‌های مافیک [۳۵]. براساس نمودار Ni-Cr برای تعیین سنگ خاستگاه بوکسیت [۲۵، ۳۰، ۳۶-۳۸]، بیشتر نمونه‌های بوکسیت پیراشکفت از نوع بوکسیت کارستی هستند که خاستگاه پیچیده دارند (شکل ۱۳).

ویژگی‌های کانی‌شناسی، بافتی و زمین‌شیمیایی نهشته بوکسیت پیراشکفت در جدول ۴ با سایر بوکسیت‌ها مقایسه شده است.



شکل ۱۳ موقعیت نمونه‌های افق بوکسیت پیراشکفت (لوزی های تو پر) در ارتباط با سنگ مادرهای مختلف در نمودار دو متغیره Cr- Ni [۲۸].

جدول ۴ مقایسه ویژگی‌های کانی‌شناسی، بافت، زمینه و داده‌های زمین‌شیمیایی نهشته‌های بوکسیتی مختلف در جهان و ایران با نهشته بوکسیتی پیراشکفت.

موقعیت کانسار بوکسیتی	کانی شناسی	بافت	زمینه	Al_2O_3 (wt.%)	SiO_2 (wt.%)	Fe_2O_3 (wt.%)	TiO_2 (wt.%)	REE (ppm)	Eu/Ee*	Ce/Ce*
Apulian (ایتالیا) [۲۵]	بوهمیت، هماتیت، کائولینیت، آناتاز، گوتیت، روتیل و کلسیت	اووئیدی	نا منظم ریخت (پلیتومورفیک)	۳۹٫۸۵	۷٫۹۶	۳۶٫۳۲	۵٫۱۹	۹۳۰٫۷	۰٫۷۶ – ۰٫۸۹	۰٫۳۴ -۳٫۳۳
Nurra (ایتالیا) [۱۱]	بوهمیت، گوتیت، کائولینیت، آناتاز، و هماتیت	اووئیدی – پیزوئیدی	نا منظم ریخت	۵۶٫۳۶	۱۵٫۲۶	۹٫۷۶	۳٫۱۸	-	۰٫۷۱ – ۰٫۸۵	۰٫۸۱ -۱٫۴۲
Guangou (چین) [۳۹]	دیاسپور، آناتاز، ایلیت، کائولینیت، هماتیت و گوتیت	کریپتوکریستالین، کلسیتی و اووئید نودولار	ریزدانه‌ای و نا منظم ریخت	۶۱٫۸۷	۱۴٫۰۵	۵٫۷۷	۲٫۹۱	۵۸۶٫۰	۰٫۵۱ – ۰٫۷	۰٫۵ -۲٫۰۴
Daji Salento (چین) [۱۶]	دیاسپور، هماتیت کائولینیت، آناتاز، گیبسیت و گوتیت	پلیتومورفیک، اووئیدی و کلسیتی	نا منظم ریخت	۵۴٫۵۳	۶٫۹۴	۱۹٫۵۷	۳٫۲۵	۳۹۰٫۱۶	۰٫۴۶ – ۰٫۶۶	۰٫۳۴ -۲٫۷۶
Mortas (ترکیه) [۴۰]	بوهمیت، هماتیت، کائولینیت، دیاسپور، روتیل و آناتاز	اووئید – پیزوئیدی و توده ای	ریزدانه‌ای و نا منظم ریخت	۴۸٫۸۶	۸٫۰۶	۱۶٫۷۴	۲٫۰۶	۵۹۱٫۹۸	۰٫۶ – ۰٫۷	۰٫۴ -۲٫۰
بوکسیت مندان (زاگرس – ایران) [۴۱]	بوهمیت، دیاسپور، کائولینیت، کلریت، آناتاز، هماتیت، پیریت، کلسیت، روتیل و گوتیت	پلیتومورفیک و پیزوئید – اووئید کروی	ریزدانه‌ای، ریزبلوری و سراسرخودشکل	۴۶٫۴۸	۱۶٫۵۴	۱۰٫۳۹	۲٫۲۲	۵۸۱٫۵۷	۰٫۵۸ – ۰٫۶۸	۱ – ۱٫۵۲
بوکسیت سمیرم (زاگرس- ایران) [۴۲]	بوهمیت، دیاسپور، کائولینیت، هماتیت، کلسیت، آناتاز و دیکیت	پیزوئید – اووئیدی	درشت بلوری، نا منظم ریخت و سراسر خودشکل	۲۲٫۹۸	۳۴٫۸۲	۲۰٫۵۱	۱٫۳۸	۲۹۳٫۸۳	۰٫۶۵ – ۰٫۸۱	۰٫۴۹ -۱٫۶۴
بوکسیت مومبی (زاگرس – ایران) [۳۶]	بوهمیت، دیاسپور، هماتیت، کائولینیت، گیبسیت، گوتیت و آناتاز	اووئید – پیزوئیدی و اووئیدی کروی	نامنظم ریخت ، ریزدانه‌ای و سراسرخودشکل	۵۰٫۸۵	۱۹٫۲	۱۰٫۷۴	۱٫۸۵	۴۰۸٫۶۵	۰٫۴۸ – ۰٫۷۱	۰٫۴۸ – ۲٫۰
بوکسیت لوداب (زاگرس – ایران) [۴۳]	بوهمیت، دیاسپور، لپیدوکروزیت، گوتیت هماتیت و کائولینیت،	پیزوئیدی – اووئیدی	نا منظم ریخت و ریزدانه‌ای	۵۴٫۴۶	۱۲٫۹۲	۱۵٫۵۴	۲٫۳۷	۰	۰٫۱۹ – ۰٫۲۴	۱٫۵۱ – ۶٫۳۴
بوکسیت پیراشکفت (منطقه مورد بررسی)	بوهمیت، دیاسپور، هماتیت، آناتاز، کائولینیت، گوتیت و روتیل	پلیتومورفیک و پیزوئید - اووئیدی	ا منظم ریخت ، ریزدانه‌ای و سراسر خودشکل	۴۷٫۵۳	۱۶٫۷۲	۱۸٫۳	۲٫۲	۳۹۶٫۸	۰٫۲۶ – ۰٫۹۹	۱٫۲ – ۲٫۳۳

برداشت

نهشته بوکسیت پیراشکفت در یال شمالی تاقدیس پسکوهک، در منطقه پیراشکفت از توابع شهرستان ممسنی در استان فارس قرار دارد. بوکسیت پیراشکفت از نوع کارستی و مدیترانه‌ای است. در برش عمودی، افق بوکسیتی پیراشکفت بین سازند آهکی سروک و شیل و مارن‌های نازک لایه سازند گورپی قرار دارد و در پی یک ناپیوستگی در اواخر تورنین برآمده فازکوهزایی لارامید تشکیل شده است. بر اساس نتایج سنگ‌نگاری، بافت زمینه از نامنظم ریخت (پلیتومورفیک) و ریزدانه‌ای تا سراسر خود شکل متغیر است. همچنین زمینه بیشتر از هماتیت و کلسیت است. براساس نتایج XRD، کانی‌های اصلی تشکیل دهنده بوکسیت مورد بررسی، شامل بوهمیت، هماتیت، دیاسپور، کائولینیت، گوتیت، کالکوپیریت و آناتاز و کانی‌های فرعی اسپینل، روتیل، کائولینیت هستند. در افق بوکسیتی، کانی آلومینیوم‌دار غالب بوهمیت است. بر اساس نمودار سه تایی SiO_2-Al_2O_3-Fe_2O_3، کانسنگ‌های بازماندی مورد بررسی در پیراشکفت را می‌توان به سه دسته بوکسیت کائولینیتی، بوکسیتی و بوکسیت آهنی رده‌بندی کرد. همچنین بر پایه این نمودار، سنگ مادر دستخوش لاتریتی شدن متوسط تا شدید شده است. در الگوی توزیع عناصر جزئی نسبت به پوسته قاره‌ای بالایی، بیشترین غنی شدگی مربوط به عنصر Ti است. این الگو برای همه نمونه‌ها غنی‌شدگی از عناصر Ba, U, Nb, Th و Ti و تهی شدگی از Rb و Sr نشان می‌دهد، در حالیکه نمونه‌های آهکی سروک روندی متفاوت دارند. الگوی REEها پس از بهنجارسازی با کندریت نشان می‌دهد که LREEها نسبت به HREE ها غنی شده‌اند. مقدار بی هنجاری Eu تقریبا در همه نهشته یکنواخت است که این نشان می‌دهد که فرآیند بوکسیتی شدن اثری بر بی‌هنجاری Eu ندارد. برای

[DOR: 20.1001.1.17263689.1401.30.2.1.7]
[DOI: 10.52547/ijcm.30.2.191]

تعیین سنگ خاستگاه از نمودارهای مختلف استفاده شد. براساس نمودار Ni-Cr برای تعیین سنگ خاستگاه بوکسیت، بیشتر نمونه‌های بوکسیت پیراشکفت از نوع بوکسیت کارستی هستند که خاستگاه پیچیده دارند.

قدردانی

از کمیته پژوهشی دانشگاه شیراز که در انجام این پژوهش حمایت کردند، قدردانی می‌شود. از راهنمایی‌های سرکار خانم دکتر مریم خسروی کمال تشکر را داریم. از راهنمایی‌های ارزنده داوران محترم در بهبود هرچه بیشتر محتوای مقاله نیز کمال تشکر و قدردانی را داریم.

مراجع

[1] Bardossy G., "*Karst bauxites: developments in economic geology"*, (1984).

[2] Boni M., Rollinson G., Mondillo N., Balassone G., Santoro L., *"Quantitative mineralogical characterization of karst bauxite deposits in the Southern Apennines, Italy*", Econ. Geol. 108 (2013) 813–833.

[3] Abedini A., Calagari A.A., "*REE geochemical characteristics of titanium-rich bauxites: the Permian Kanigorgeh horizon, NW Iran",* Turk. J. Earth Sci. 23 (2014) 513–532.

[4] Mongelli G., Buccione R., Gueguen E., Langone A., Sinisi R., "*Geochemistry of the apulian allochthonous karst bauxite, Southern Italy: Distribution of critical elements and constraints on Late Cretaceous Peri-Tethyan palaeogeography",* Ore Geology Reviews, 77 (2016) 246-259.

[5] Calagari A. A., Abedini A., *"Geochemical investigations on Permo-Triassic bauxit horizon at Kanisheeteh, east of Bukan, West-Azarbaidjan, Iran",* Journal of Geochemical Exploration, 94(1), 1-18.

[6] Garrels R.M., Christ C.L., "*Solutions, Minerals and Equilibria. Harper and Row,New York",* pp. 450. Geochemical Journal 37 (1965) 627–637.

[7] Karimpour M., Saadat S., "*Applied Economic Geology",* Mashhad Ferdowsi University *(in persian)* (2002).

[8] Zarasvandi A., Zamanian H., Hejazi E., *"Immobile elements and mass changes geochemistry at Sar-Faryab bauxite deposit, Zagros Mountains, Iran",* Journal of Geochemical Exploration, 107 (2010) 77–85.

[9] Agha Nabati A., *Geology of Iran*, Geological Survey of Iran. *(in persian)*" (2004).

[10] Aleva G.J.J., "*Laterites: Concepts, Geology, Morphology and Chemistry; International Soil Reference and Information Centre (ISRIC):Wageningen, The Netherlands"*, 1994; Volume 169.

[11] Mameli P., Mongelli G., Oggiano G., Dinelli E., "*Geological, geochemical and mineralogical features of some bauxite deposits from Nurra (Western Sardinia, Italy): insights on conditions of formation and parental affinity",* International Journal of Earth Sciences, 96(5) (2007) 887-902.

[12] Meyer F. M., Happel U., Hausberg J., Wiechowski A., "*The geometry and anatomy of the Los Pijiguaos bauxite deposit, Venezuela",* Ore Geology Reviews, 20(1-2) (2002) 27-54.

[13] Karadağ M. M., Küpeli Ş., Arýk F., Ayhan A., Zedef V., Döyen A., "*Rare earth element (REE) geochemistry and genetic implications of the Mortaş bauxite deposit (Seydişehir/Konya–Southern Turkey)",* Chemie der Erde-Geochemistry, 69(2) (2009) 143-159.

[14] Özlü N., "*Trace-element content of Karst Bauxites and their parent rocks inthe Mediterranean Belt",* Mineral. Depos. 18 (1983) 469–476.

[15] Wang Q.F., Liu X.F., Yan C.H., Cai S.H., Li Z.M., Wang Y.R., Zhao J.M., Li G.J., "*Mineralogical and geochemical studies of boron-rich bauxite ore deposits inthe Songqi region, SW, Henan", China*. Ore Geol. Rev. 48 (2012) 258–270.

[16] Liu X., Wang Q., Deng J., Zhang Q., Sun S., Meng J., "*Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China",* Journal of Geochemical exploration, 105(3) (2010) 137-152.

[17] Meshram R. R., Randive K. R., "*Geochemical study of laterites of the Jamnagar district, Gujarat, India: Implications on parent rock, mineralogy and tectonics",* Journal of Asian Earth Sciences, 42(6) (2011) 1271-1287.

[18] Maclean W. H., Bonavia F. F., Sanna G., "*Argillite debris converted to bauxite during karst weathering: evidence from immobile element geochemistry at the Olmedo Deposit, Sardinia",* Mineralium Deposita, 32(6) (1997) 607-616.

[19] Tang H.S., Chen Y.J., Wu G., Yang T., "*Rare earth element geochemistry of carbonates of Dashiqiao Formation, Liaohe Group, eastern Liaoning province: implications for Lomagundi Event",* Acta Petrol Sin-Engl 25 (2009) 3075–3093.

[20] Tang H.S., Chen Y.J., Santosh M., Zhong H., Yang T., "*REE geochemistry of carbonates from the Guanmenshan Formation, Liaohe Group, NE Sino-Korean Craton: Implications for seawater compositional change during the Great Oxidation Event",* Precambrian Res 227 (2013) 316–336.

[21] Deng X.H., Chen Y.J., Yao J.M., Bagas L, Tang H.S., "*Fluorite REE-Y(REY) geochemistry of the ca. 850 Ma Tumen molybdenite-fluorite*

[32] Mongelli G., Taghipour B., Sinisi R., Khadivar S., "*Mineralization and element redistribution in the Chah-Gheib Ni-laterite ore zone, Bavanat, Zagros Belt, Iran",* Ore Geology Reviews, 111 (2019) 102990.
[33] Abedini A., Khosravi M., Calagari A. A., "*Geochemical characteristics of the Arbanos karst-type bauxite deposit, NW Iran: implications for parental affinity and factors controlling the distribution of elements",* Journal of Geochemical Exploration, 200 (2019) 249-265.
[34] Boynton W.V., "*Geochemistry of the REE: meteorite studies",* Pp. 63–114 in. Rare earth element geochemistry (P.Henderson, editor). Elsevier, Amsterdam (1984).
[35] Mondillo N., Balassone G., Boni M., Rollinson G., "*Karst bauxites in the Campania Apennines (southern Italy): a new approach",* Periodico di Mineralogia, 80(3) (2011) 407-432.
[36] Zamanian H., Ahmadnejad F., Zarasvandi A., "*Mineralogical and geochemical investigations of the Mombi bauxite deposit, Zagros Mountains, Iran",* Geochemistry, 76(1) (2016) 13-37.
[37] Valeton I., Biermann M., Reche R., Rosenberg F., "*Genesis of nickel lateritesand bauxites in Greece during the Jurassic and Cretaceous, and their relation toultrabasic parent rocks",* Ore Geol. Rev. 2 (1987) 359–404.
[38] Taylor S.R., McLennan S.M., "*The Continental Crust: Its Composition andEvolution".* Blackwell Oxford, (1995) pp. 1–312.
[39] Liu X., Wang Q., Feng Y., Li Z., Cai S., *"Genesis of the Guangou karstic bauxite deposit in western Henan, China",* Ore Geology Reviews, 55 (2013) 162-175.
[40] Temur S., Kansun G., "*Geology and petrography of the Masatdagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey",* Journal of Asian Earth Sciences, 27(4), 512-522.
[41] Zarasvandi A., Carranza E. J. M., Ellahi S. S. "*Geological, geochemical, and mineralogical characteristics of the Mandan and Deh-now bauxite deposits, Zagros Fold Belt, Iran",* Ore Geology Reviews, 48 (2012) 125-138.
[42] Salafzoon. M., "*Mineralogy, geochemistry and determination of the origin of Semirom bauxite deposit, high Zagros",* Master Thesis, Shiraz University. *(in persian)*" (2015).
[43] Azarnia S., "*Mineralogy, geochemistry and determination of the origin of Lodab, bauxite deposits,Yasuj, Kohgoluyeh and Boyer-Ahmad.* Master Thesis, Shiraz University. *(in persian)*" (2017).
deposit, eastern Qinling, China: constraints on ore genesis", Ore Geol Rev 63 (2014) 532–543.
[22] Chen Y.J., Tang H.S., "*The great oxidation event and its records in North China Craton. In: Zhai MG, Zhao Y, Zhao TP (eds) Main tectonic events and metallogeny of the North China Craton",* Springer, Singapore, (2016) pp 281–304
[23] Compton J.S., White R.A., Smith M., "*Rare earth element behavior in soilsand salt pan sediments of a semi-arid granitic terrain in the Western Cape,South Africa",* Chem. Geol. 201, (2003) 239–255.
[24] Esmaeily D., Rahimpour-Bonab H., Esna-Ashari A., Kananian A., "*Petrography and geochemistry of the Jajarm Karst bauxite ore deposit, NE Iran: implications for source rock material and ore genesis",* Turk J Earth Sci 19 (2010) 267–284
[25] Mongelli G., Boni M., Buccione R., Sinisi R., "*Geochemistry of the Apulian karst bauxites (southern Italy): Chemical fractionation and parental affinities",* Ore Geology Reviews, 63 (2014) 9-21.
[26] Khosravi M., Abedini A., Alipour S., Mongelli G., "*The Darzi-Vali bauxite deposit, West-Azarbaidjan Province, Iran: critical metals distribution and parental affinities",* J Afr Earth Sci 129 (2017) 960–972
[27] Defant M.J., Drummond M.S., "*Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere",* Nature, 347(6294) (1990) 662–665.
[28] Schroll E., Sauer D., "*Beiträgezur Geochemie von Titan, Chrom, Nickel, Cobalt,Vandium und Molybdän in bauxitishcen Gesteinen und das Problem der stoffichen Herkunft des Alumniums",* Travax du l'ICSOBA, Zagreb, vol. 5 (1968) pp. 83–96.
[29] Salamab-Ellahi S., Taghipour B., Mongelli G., "*Clayey bauxite from the Irano-Himalayan belt: Critical metals, provenance and palaeoclimate in the Upper Cretaceous Semirom ore deposit, Zagros Mountain, Iran",* Journal of Asian Earth Sciences, 172, 126-142.Schellmann W (1986) A new definition of laterite. Memoirs Geol Surv India 120:1–7.
[30] Ahmadnejad F., Zamanian H., Taghipour B., Zarasvandi A., Buccione R., Ellahi S. S., *"Mineralogical and geochemical evolution of the Bidgol bauxite deposit, Zagros Mountain Belt, Iran: Implications for ore genesis, rare earth elements fractionation and parental affinity",* Ore Geology Reviews, 86 (2017) 755-783.
[31] Braun J.J., Pagel M., Muller J.P., Bilong P., Michard A., Guillet B., "*Ce anomalies in lateritic profiles",* Geochim Cosmochim Acta 54 (1990) 781–795.